

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЦИБУЛЬНИК СЕРГІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 004.925.8:519.876.5:699.83

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА
ЗАХИСТУ РЕЗЕРВУАРІВ НА ОСНОВІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Спеціальність: 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення
складу речовин

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів і систем орієнтації і навігації приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бурау Надія Іванівна
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», завідувач кафедри приладів і систем орієнтації і навігації.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Шевченко Олександр Іванович
Головна астрономічна обсерваторія НАН України, провідний інженер

кандидат технічних наук
Суслов Євгеній Федорович
Національний авіаційний університет, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних систем

Захист відбудеться « 31 » травня 2016 р. о 16⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.18 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою:

03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. №1, ауд. 293.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці НТУУ «КПІ» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «__» квітня 2016 р.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор



І.Г. Чиж

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з актуальних проблем машинобудування, енергетики, нафтогазової галузі, хімічної промисловості є забезпечення надійної, безаварійної та ефективної експлуатації резервуарів для зберігання екологічно-небезпечних речовин (ЕНР). Пошкодження та руйнування таких об'єктів призводять до забруднення довкілля та несуть загрози для людей, що проживають на прилеглих територіях.

Основним експлуатаційним фактором безпечного функціонування резервуарів є діагностика з метою визначення їх поточного функціонального стану та виявлення пошкоджень. Для діагностики найчастіше використовуються такі методи неруйнівного контролю, як акустична емісія, ультразвукова дефектоскопія, вібраційна діагностика, тощо. Традиційно вдосконалення таких методів та засобів проводиться з метою підвищення точності, чутливості, збільшення швидкодії при виявленні дефектів та пошкоджень. Але серед резервуарів з ЕНР є такі, що:

- експлуатуються в критичних умовах – у важкодоступних місцях в умовах комплексного впливу навантажень, які часто перевищують розраховані значення;
- характеризуються максимально жорсткими умовами щодо збереження їх цілісності та попередження витоку ЕНР.

Для таких об'єктів важливим є не лише визначення технічного стану (ТС), а попередження появи пошкоджень, що можуть призвести до руйнування елементів конструкції та витоку ЕНР, шляхом оцінки експлуатаційних навантажень, захисту об'єктів від негативного впливу навантажень, прогнозування зміни ТС. Тому актуальною задачею є вдосконалення засобів функціональної діагностики та захисту резервуарів, що експлуатуються в критичних умовах, для забезпечення їх безаварійної експлуатації.

В дисертаційній роботі таку задачу пропонується вирішити на основі імітаційного моделювання, яке на сьогоднішній день є потужним інструментом наукових досліджень та перспективним напрямком розвитку засобів моніторингу та діагностики складних просторових об'єктів, що знаходяться у важкодоступних місцях під впливом динамічних та кліматичних навантажень.

Актуальність роботи полягає в науковому обґрунтуванні та вдосконаленні засобів функціональної діагностики резервуарів на основі імітаційного моделювання шляхом оцінки експлуатаційних навантажень, захисту резервуарів від негативного впливу навантажень, прогнозування зміни ТС для попередження руйнування резервуарів та витоку ЕНР.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі приладів і систем орієнтації та навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» відповідно до держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розробка комплексної інтелектуальної системи моніторингу технічного стану конструкцій в експлуатації» (№ДР 0113U000498); «Розробка методичного забезпечення та макетного зразку системи моніторингу на основі концепції Structural Health Monitoring» (№ДР 0115U000318), а також в рамках теми «Розробка автоматизованої системи раннього попередження

можливості витоку палива на українській антарктичній станції Академік Вернадський» (№ДР 0111U008931, №ДР 0112U004907, № ДР 0113U004970).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є обґрунтування та вдосконалення на основі імітаційного моделювання системи функціональної діагностики та засобів захисту резервуарів з екологічно-небезпечними речовинами, які експлуатуються у важкодоступних місцях під впливом природних та техногенних збурень.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних задач:

1. Проаналізувати сучасний стан методів та засобів функціональної діагностики резервуарів з ЕНР та обґрунтувати шляхи їх вдосконалення для забезпечення попередження руйнування резервуарів та витоку ЕНР.

2. Виконати геометричне та імітаційне моделювання резервуара в умовах вітрового навантаження та встановити характер і функціональну залежність впливу вітрового навантаження на резервуар.

3. Розробити, теоретично обґрунтувати та дослідити геометричні моделі засобів захисту резервуарів від тиску повітряного потоку, проаналізувати ефективність засобів захисту для резервуарів з наземним та підземним фундаментами.

4. Розробити та обґрунтувати загальну структуру вдосконаленої багатоканальної системи функціональної діагностики резервуарів на основі використання їх моніторингових моделей.

5. На основі імітаційного моделювання розробити підсистему візуалізації для відображення та прогнозування характеристик напружено-деформованого стану, просторового положення та вібраційного стану резервуару в реальних умовах навантажень.

6. Оцінити адекватність використаних імітаційних моделей на основі експериментальних досліджень макета каналу вимірювання вібрації системи діагностики.

7. Впровадити результати досліджень.

Об'єктом дослідження є резервуари для зберігання екологічно-небезпечних речовин при критичних умовах експлуатації та засоби їх функціональної діагностики.

Предметом дослідження є геометричні та імітаційні моделі резервуарів, вдосконалення засобів функціональної діагностики та захисту резервуарів на основі імітаційного моделювання.

Методи дослідження: Методи геометричного моделювання використано для створення тривимірних моделей резервуарів та засобів захисту; за допомогою методів імітаційного моделювання складних інженерних об'єктів проведено дослідження резервуарів в умовах, близьких до реальних умов експлуатації; для оцінки адекватності імітаційних моделей використано методи обробки інформації, спектрального та частотно-часового аналізу, методи технічної діагностики, зокрема вібраційний метод вільних коливань; прогнозування зміни технічного стану виконано на основі методів прогнозової екстраполяції; оцінку достовірності апроксимації функціональних залежностей вітрового навантаження виконано на основі методів теорії ймовірності; інформаційну модель підсистеми візуалізації розроблено на основі методів графічного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

1. На основі імітаційного моделювання вперше встановлено функціональну залежність впливу вітрового навантаження на резервуар, що дозволяє визначити області безпечної експлуатації, появи пластичних деформацій та потенційного руйнування конструкції резервуара.

2. Вперше обґрунтовано та розроблено засоби захисту резервуару від вітрового навантаження, визначено їх характеристики для забезпечення зниження на 40% максимального тиску на стінки резервуара.

3. Для вдосконалення системи функціональної діагностики обґрунтовано та розроблено підсистему візуалізації на основі моніторингових моделей об'єкта для відображення та прогнозування характеристик напружено-деформованого стану, просторового положення та вібраційного стану в реальних умовах навантажень.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що створено наукові основи практичної реалізації засобу захисту резервуарів та підсистеми візуалізації нової багатоканальної системи функціональної діагностики. Зокрема, розроблено функціональну схему системи діагностики, алгоритмічне та програмне забезпечення для підсистеми візуалізації даних комплексних вимірювань напружень та кутового положення об'єкта, розроблено методику вібраційних вимірювань, алгоритмічне та програмне забезпечення обробки вібраційних сигналів, алгоритмічне та програмне забезпечення прогнозування зміни рівня деформацій, розроблено моделі для використання в функціональних блоках систем моніторингу та діагностики резервуарів для зберігання екологічно-небезпечних речовин, розроблено рекомендації по вибору типу та характеристик захисних засобів від вітрового навантаження для резервуарів з підземним та наземним фундаментом.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Автором самостійно отримано основні положення, які винесені на захист (встановлено функціональну залежність вітрового навантаження на резервуар; визначено області безпечної експлуатації, появи пластичних деформацій та потенційного руйнування конструкції резервуара; обґрунтовано та розроблено засоби захисту резервуару від вітрового навантаження, визначено їх характеристики та досліджено ефективність; обґрунтовано та розроблено підсистему візуалізації для відображення та прогнозування характеристик напружено-деформованого стану, просторового положення та вібраційного стану в реальних умовах навантажень). Самостійно розроблено імітаційні моделі резервуара, методики їх досліджень, алгоритмічне та програмне забезпечення. За безпосередньою участю автора розроблено методики та проведено експериментальні дослідження макета каналу вимірювання вібрації системи раннього попередження витoku ЕНР.

У роботах, виконаних у співавторстві, особисто автором виконано: [1] - побудовано геометричні моделі резервуара, проведено аналітичний розрахунок та імітаційне моделювання вітрового навантаження на резервуар; [2] - побудовано геометричну модель резервуара, яка відповідає реальній конструкції; [5] - запропоновано концепцію візуалізації даних вимірювань в багатоканальних інформаційно-діагностичних комплексах на базі імітаційного моделювання та систем захвату руху; [6] - побудовано геометричну модель резервуара, проведено модальний аналіз та написано алгоритми завантаження та перетворення даних, а також формування скорегованих векторів даних для програми обробки сигналів вібрації; [7] - обґрунтова-

но принципи роботи пристрою графічного відображення результатів; [8] - проведено теоретичне обґрунтування способу вимірювання малих лінійних переміщень; [9] - обґрунтовано принципи роботи системи; [10] - описано характер вітрового навантаження на резервуар в умовах Антарктики; [11] - проведено модальний аналіз резервуара; [12] - проведено порівняння методів обробки сигналів вібрації; [13] - проведено огляд тривимірних моделей вертикального сталевго резервуара, а також проблем, які виникли в процесі їх побудови; [14] - побудовано три геометричні моделі вертикального сталевго резервуара; [15] - створено ряд тривимірних моделей резервуара різної складності; [16] - проведено оптимізацію геометричних моделей резервуара для коректної побудови скінчено-елементної сітки; [17] - проведено імітаційне моделювання для вибору оптимальної геометричної моделі резервуара з метою її використання у одному з блоків автоматизованої системи діагностики; [19] - показано, що неправильно підібрані параметри засобу пасивного захисту від вітрового навантаження призводять до появи додаткових динамічних збурень у вигляді вібрації; [24] - написано алгоритми завантаження даних та тривимірної моделі, а також відображення даних тензометричних вимірювань на тривимірній моделі; [25] - написано алгоритми завантаження та перетворення даних, а також формування скорегованих векторів даних для програми обробки сигналів вібрації; [26] - проаналізовано результати імітаційного моделювання вітрового навантаження на резервуар в умовах використання засобів пасивного захисту від вітрового навантаження.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на таких конференціях, конгресах, з'їздах, семінарах, нарадах: X, XIII, XIV міжнародних науково-технічних конференціях «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2011, 2014, 2015рр.; IV-V науково-практичних конференціях студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», м. Київ, 2011-2012рр.; XIV міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологія. Людина. Суспільство», м. Київ, 2011р.; 3-тій та 4-тій науково-практичних конференціях студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», м. Івано-Франківськ, 2011, 2013рр.; Першій Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів, молодих вчених «Сучасні тенденції розвитку приладобудування», м. Луганськ, 2012 р.; VI міжнародній Антарктичній конференції «Інтернаціоналізація досліджень в Антарктиці – шлях до духовної єдності людства», м. Київ, 2013р.; VII міжнародній Антарктичній конференції «Антарктичні дослідження: нові горизонти та пріоритети», м. Київ, 2015р.; IV міжнародній науково-технічній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування», м. Тернопіль, 2015р.

Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «КПІ».

Публікації. За темою дисертаційних досліджень опубліковано 26 наукових праць, у тому числі 6 статей у фахових виданнях, з них 5 у виданнях, що входять до науко-метричних баз даних, 3 патенти України на корисну модель, 14 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях, 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір, 1 стаття в інших виданнях.

Структура й обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань зі 135 назв. Загальний обсяг дисертації становить 186 сторінок, 78 рисунків, 6 таблиць та 2 додатки на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання досліджень, наведено дані про наукову новизну, практичну цінність та впровадження отриманих результатів, дані про публікації та апробацію результатів досліджень, показано зв'язок роботи з науковими програмами й проектами.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану та існуючих проблем оцінки поточного технічного стану резервуарів вертикальних сталевих (РВС) для зберігання екологічно небезпечних речовин, показано тенденції розвитку систем функціональної діагностики таких резервуарів.

Резервуари для зберігання ЕНП є складними інженерно-технічними спорудами, для несучих конструкцій яких використовуються різноманітні матеріали (метал, залізобетон, дерево, камінь, синтетичні матеріали та ін.). Найбільш поширеними в Україні та закордоном є зварні РВС. Головними характеристиками таких відповідальних об'єктів є здатність відповідати своєму цільовому призначенню при різних навантаженнях та здатність зберігати цілісність і незмінність положення в просторі при впливі фізичних та хімічних факторів. А головними вимогами, що пред'являються до резервуарів з ЕНП в експлуатації, – забезпечення їх цілісності та попередження витіку ЕНП.

Дефекти та пошкодження в елементах конструкцій РВС виникають як внаслідок технологічних та виробничих факторів, так і в процесі їх експлуатації під впливом неконтрольованих збурень техногенного та/або природного походження. Основними збуреннями є сейсмічні, вітрові навантаження, коливання рівня ЕНП. У сукупності з іншими чинниками (різкі зміни температури, корозія металу, втомні процеси в основному металі та зварних з'єднаннях, деформація опор і фундаментів) це призводить до зміни ТС резервуарів. Втрата несучої здатності резервуара через появу та розвиток в ньому дефектів і пошкоджень може призвести до аварійних ситуацій зі значними матеріальними та екологічними збитками, а іноді й до людських жертв. Тому забезпечення безпечної експлуатації РВС і попередження витіку ЕНП є важливою та актуальною проблемою. Серед низки заходів, спрямованих на вирішення цієї проблеми, в нормативних документах передбачаються такі, як:

- необхідність контролю цілісності та загального ТС резервуара;
- забезпечення відповідності зовнішніх збурень на резервуар, які враховані при його проектному розрахунку;
- захист резервуара від зовнішніх впливів, значення яких не враховані або перевищують проектні.

Таким чином, основним експлуатаційним фактором безпечного функціонування резервуарів є функціональна діагностика з метою визначення їх поточного функціонального стану та виявлення пошкоджень. На сьогоднішній день системи функціональної діагностики використовуються в найрізноманітніших сферах промисловості, у тому числі для контролю резервуарів для зберігання ЕНП. В таких си-

стемах застосовуються різні методи неруйнівного контролю (акустична емісія, ультразвукова дефектоскопія, вібраційна діагностика, тощо), а вдосконалення їх проводиться з метою підвищення точності, чутливості, вірогідності, надійності контролю, збільшення швидкодії при виявленні дефектів та пошкоджень, автоматизації, тощо.

Але для РВС, що експлуатуються у важкодоступних місцях та критичних умовах, як, наприклад, резервуар для зберігання дизельного пального на українській антарктичній станції Академік Вернадський, вкрай важливим є попередження появи таких дефектів, які можуть призвести до витoku ЕНР. Для таких РВС знання природи, джерел та характеру впливу зовнішніх і внутрішніх збурень, а також їх наслідків дозволить визначити необхідні діагностичні параметри та встановити такі їх значення, перевищення яких у процесі експлуатації резервуарів свідчатиме про зміну ТС об'єкта. Тому задачу забезпечення безпечної експлуатації таких РВС можна вирішити шляхом оцінки експлуатаційних навантажень на РВС, захисту резервуара від негативного впливу навантажень, прогнозування зміни ТС. Все це потребує вдосконалення засобів функціональної діагностики та захисту резервуарів, які експлуатуються в критичних умовах, що наразі є актуальною науково-практичною задачею.

Аналіз сучасних тенденцій розвитку систем функціональної діагностики показав, що вдосконалення у більшості випадків відбувається завдяки підвищенню точності первинних перетворювачів, проте широке використання мікропроцесорної техніки, сучасних методів і засобів обробки діагностичної інформації, стрімкий розвиток нових перспективних методів дослідження об'єктів та процесів на основі імітаційного моделювання, нові можливості багатовимірної візуалізації діагностичної інформації забезпечують вдосконалення систем функціональної діагностики за допомогою можливостей сучасних комп'ютерних та інформаційних технологій.

Аналіз публікацій за темою дисертації показав, що дослідження зосереджені на окремих напрямках, таких як: розробка математичних моделей резервуарів та їх чисельний аналіз; аналітичні розрахунки навантажень; аналіз експлуатаційних факторів пошкодження елементів конструкцій, які не можуть бути враховані розрахунками міцності і стійкості; розробка захисних споруд та моделювання навантажень на них та об'єкти захисту; вдосконалення систем діагностики на основі підвищення точності, чутливості первинних перетворювачів, використання мережевих технологій. Але у наявних дослідженнях для спрощення аналітичних розрахунків часто не враховується ряд зовнішніх чи внутрішніх факторів, які можуть вносити значні уточнення в результат, недостатньо дослідженими є оцінка впливу вітрового навантаження на резервуар, обґрунтування та розробка засобів захисту РВС та оцінка їх ефективності, досить обмежені дослідження по вдосконаленню систем функціональної діагностики для прогнозування ТС та попередження пошкоджень і витoku ЕНР. В результаті зроблено висновок, що існуючі дослідження є обмеженими і не дозволяють розв'язати актуальне завдання вдосконалення засобів функціональної діагностики та захисту резервуарів, які експлуатуються в критичних умовах, для забезпечення їх безпечної експлуатації, попередження пошкоджень і витoku ЕНР. В дисертаційній роботі таке завдання запропоновано розв'язати на основі імітаційного моделювання.

Таким чином, проведений аналіз дозволив сформулювати наведені вище мету та задачі дисертаційної роботи та обрати відповідні їм методи досліджень.

Другий розділ присвячено геометричному та імітаційному моделюванню резервуара в умовах вітрового навантаження, встановленню характеру і функціональної залежності впливу вітрового навантаження на резервуар.

Помилки у проектному значенні розрахункової величини вітрового навантаження, неправильне уявлення про характер його розподілу по об'єкту, недостатній облік аеродинамічних характеристик, вібрація резервуара є одними з основних факторів ризику виникнення аварійних ситуацій РВС для зберігання ЕНР. Тому для РВС, які експлуатуються в умовах таких динамічних збурень, як вітрові навантаження, важливим є аналіз та визначення його критичних величин, встановлення функціональних залежностей впливу навантаження на резервуар. Це дозволить обґрунтувати та забезпечити можливість безпечної експлуатації об'єкта, якщо значення вітрового навантаження не перевищують проектні, або ж розробити ефективні засоби захисту у разі підвищених значень навантаження.

Як об'єкт контролю в дисертації розглядається РВС, установлений на українській антарктичній станції Академік Вернадський, який уособлює як найбільш жорсткі вимоги до забезпечення безпечної експлуатації РВС, так і найбільш несприятливі (критичні) умови експлуатації та можливості моніторингу його ТС.

Для зазначеного РВС в дисертації аналітично розраховано експлуатаційне значення ($W_e=508$ Па) та граничне значення ($W_m=1924$ Па) вітрового навантаження на стінки резервуару, які згідно з нормативними документами характеризують відповідно безпечну експлуатацію та екстремальну експлуатацію, що може виникнути не більш як один раз за термін експлуатації та є еквівалентною повній втраті працездатності конструкції. Виконано оцінку відносного часу, протягом якого можуть бути порушені вимоги другого граничного стану, пов'язаного з труднощами нормальної експлуатації. Установлено, що перевищення допустимого рівня деформацій або вібрації протягом 3 хвилин за добу під час експлуатації може призвести до зниження довговічності та придатності до нормальної експлуатації конструкції РВС. Тому це значення запропоновано використати як порогове значення діагностичної ознаки зміни технічного стану при розробці системи функціональної діагностики РВС.

Дослідження впливу вітрового навантаження на РВС виконано на основі імітаційного моделювання, яке дозволяє провести аналіз об'єкта будь-якої складності з урахуванням зовнішніх впливів та зі збереженням умов відповідності між процесами і явищами, що моделюються, та процесами і явищами, що протікають в об'єкті. Для дослідження було розроблено геометричні моделі РВС – тривимірні комп'ютерні моделі, які описують зовнішню форму й розміри резервуара, та дозволяють повністю або частково оцінити його взаємодію з елементами виробничого та/або експлуатаційного оточення. Геометричне моделювання РВС виконано з урахуванням таких припущень:

- дах, стінка та дно об'єднані, резервуар приймається повністю одноелементним;
- серед конструктивних елементів реального резервуару, які можуть мати значний вплив на результати дослідження характеру розподілу повітряного потоку по об'єкту, враховано фундамент зі сталевим каркасом та повітряні дихальні клапани.

Усього в САД-системі CATIA для подальших досліджень побудовано шість основних геометричних моделей РВС, які відрізняються формою даху, наявністю фундаменту і повітряних дихальних клапанів та їх кутом повороту до вектора швид-

кості повітряного потоку. На рис. 1 наведено геометричну модель РВС, яка повністю відповідає реальному об'єкту, спрощену модель з плоским дахом без додаткових конструктивних елементів, моделі фундаменту та повітряних клапанів.

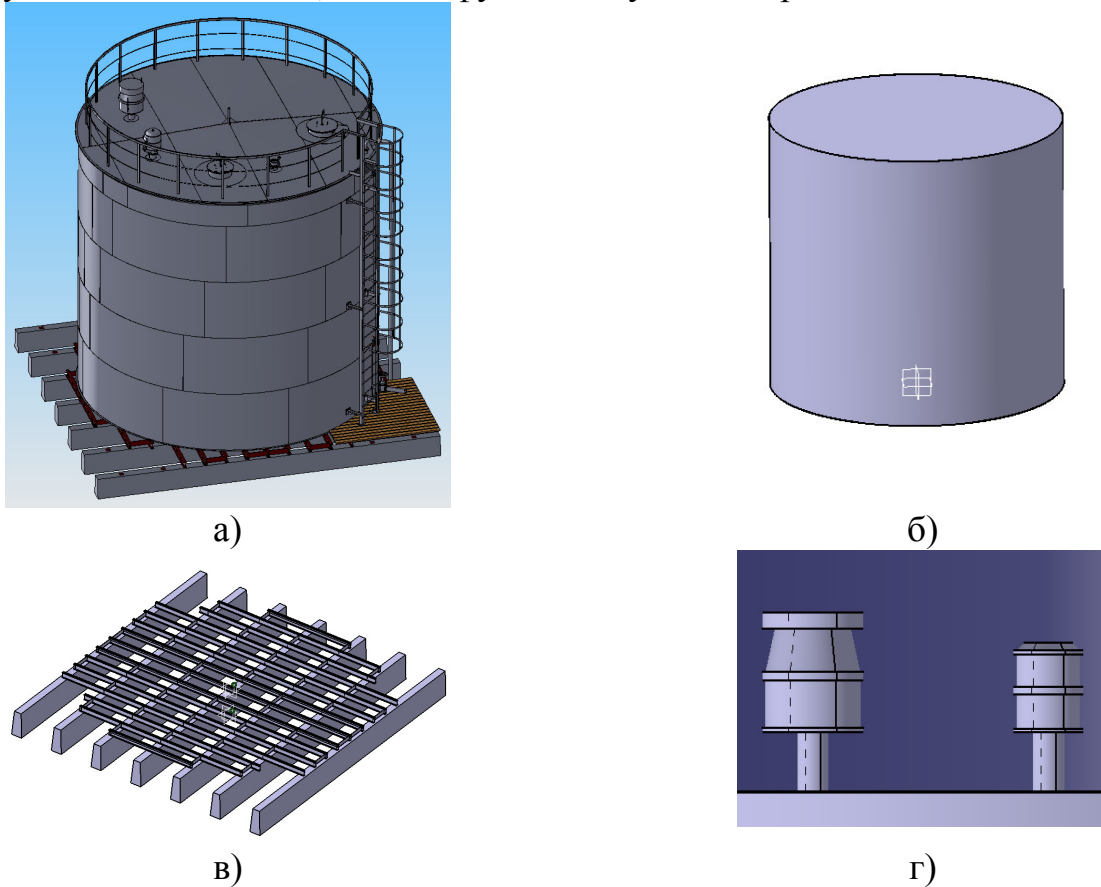


Рис. 1. Геометричні моделі: а) модель РВС повністю відповідає реальному об'єкту; б) спрощена модель з плоским дахом без додаткових конструктивних елементів; в) модель фундаменту; г) моделі повітряних клапанів

Для математичного моделювання впливу вітрового навантаження на об'єкти використовуються рівняння Нав'є-Стокса, які у векторній формі мають вигляд:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) \cdot \vec{U} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \cdot \Delta \vec{U},$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{U} = 0,$$

де \vec{U} – вектор швидкості; \vec{F} – вектор масової сили у відношенні до одиниці маси; ρ – щільність; p – тиск; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості; ∇ – оператор набла; Δ – векторний оператор Лапласа.

Для імітаційного моделювання в програмних комплексах скінчено-елементного аналізу ANSYS та FlowVision найбільш повно представлені моделі:

- наближення Буссинеска (малі зміни щільності) для опису ламінарної течії в'язкої рідини при малих числах Рейнольдса;
- к-ε модель турбулентної течії в'язкої рідини з невеликими змінами щільності при великих числах Рейнольдса;

- модель рідини, що слабо стискається, яка дозволяє розраховувати стаціонарну дозвукову течію газу при будь-яких змінах щільності;
- модель рідини, що повністю стискається: стаціонарна і нестаціонарна течія при будь-яких числах Маха (до-, транс-, понад- і гіперзвукові течії).

Враховуючи, що для обраного РВС число Рейнольдса має значення

$$Re = 0,88 \cdot d \cdot \sqrt{W_0 \cdot k(z) \cdot \gamma_{fm}} \cdot 10^5 = 691 \cdot 10^5,$$

де d – діаметр резервуара, м; $k(z)$ – висота резервуара, м, W_0 – характеристичне значення вітрового тиску, Па; γ_{fm} – коефіцієнт надійності,

для імітаційного моделювання впливу вітрового навантаження на резервуар обрано k-ε модель.

Імітаційне моделювання впливу вітрового навантаження при критичних умовах експлуатації РВС (швидкість повітряного потоку 75 м/с) виконано в програмному комплексі FlowVision. Для кожної геометричної моделі резервуара результати моделювання мають графічне (зображення розподілу тиску та швидкості повітряного потоку в межах розрахункової області у горизонтальній та вертикальній площинах) та чисельне (значення максимального тиску на стінках резервуара та максимальної швидкості повітряного потоку у розрахунковій області) подання. Приклад розподілу тиску та швидкості повітряного потоку для спрощеної моделі з плоским дахом без додаткових конструктивних елементів наведено на рис. 2, а для моделі з фундаментом – на рис. 3.

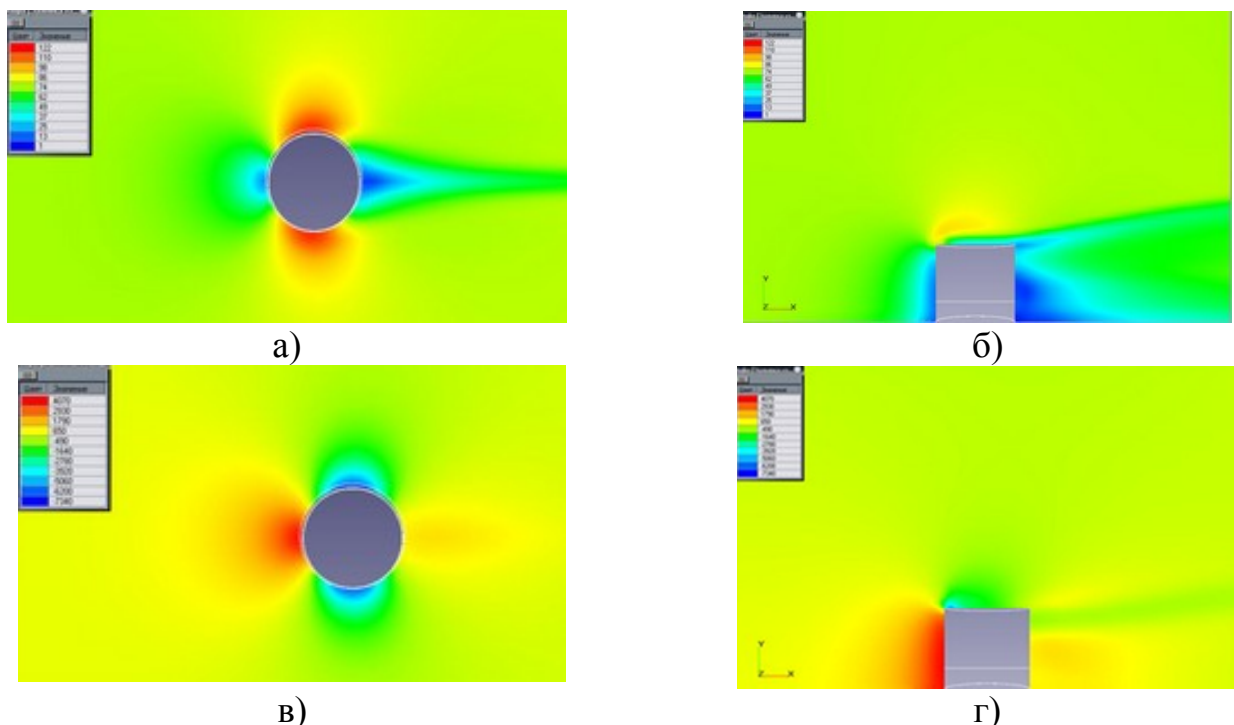


Рис. 2. Поля швидкості у горизонтальній (а) і вертикальній (б) площинах та поля тиску в горизонтальній (в) та вертикальній (г) площинах для спрощеної моделі без додаткових конструктивних елементів

Аналіз отриманих результатів показав, що вагомі зміни параметрів тиску та швидкості повітряного потоку у межах розрахункової області зумовлені лише вра-

хуванням у спрощеній моделі з плоским дахом фундаменту зі сталевим каркасом. Додаткові конструктивні елементи на даху (повітряні дихальні клапани) не вносять суттєвих відмінностей у результати моделювання, тому у подальших дослідженнях моделі резервуару з повітряними дихальними клапанами не використовуються.

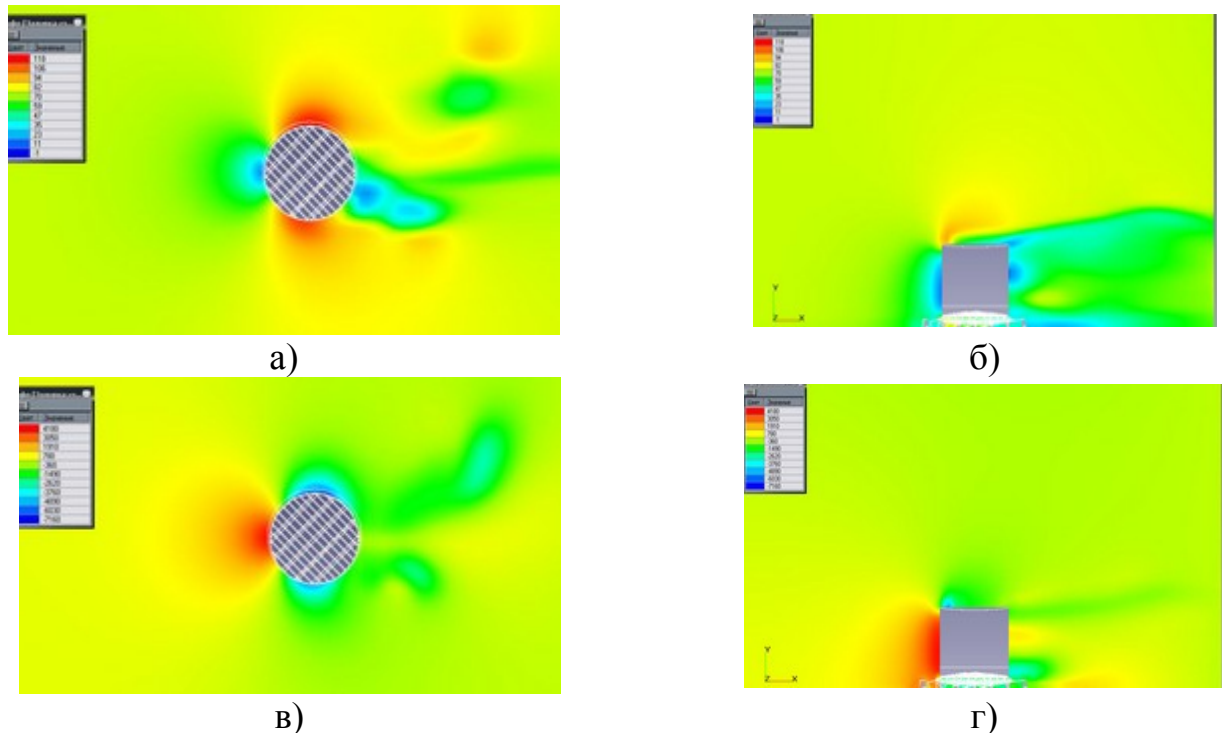


Рис. 3. Поля швидкості у горизонтальній (а) і вертикальній (б) площинах та поля тиску в горизонтальній (в) та вертикальній (г) площинах для моделі з фундаментом

Отримані кількісні значення максимального тиску на стінки резервуару та максимальної швидкості повітряного потоку у розрахунковій області добре узгоджуються між собою та з якісною оцінкою характеру розподілу вітрового навантаження по об'єкту. Порівняльний аналіз результатів імітаційного моделювання без врахування та з урахуванням в моделі вектора гравітації з результатами аналітичного розрахунку показав, що введення в імітаційну модель вектора гравітації уточнює результат аналітичного розрахунку на 10,6 %. Наприклад, максимальний тиск на стінку резервуару при швидкості повітряного потоку $V=45$ м/с становить 1339 Па, а без урахування вектора гравітації – 1231 Па. Таким чином, для подальших досліджень використано розрахункову модель з урахуванням вектора гравітації.

На основі результатів імітаційного моделювання впливу вітрового навантаження при різних значеннях швидкості повітряного потоку встановлено функціональну залежність впливу вітрового навантаження на резервуар, як залежність максимального тиску повітряного потоку на модель РВС від значення швидкості повітряного потоку у вигляді: $P = 0,6598V^2 + 0,0016V + 2,5421$, де P – максимальний тиск на стінку резервуару, Па; V – швидкість повітряного потоку, м/с (коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,98$). Отримана залежність дозволяє визначити значення швидкості повітряного потоку, при яких будуть порушуватися вимоги першого та другого граничних станів (рис. 4), та визначити такі експлуатаційні області для РВС:

1) Область нормальної (безпечної) експлуатації, що відповідає швидкості повітряного потоку до 27,5 м/с та максимальному тиску на стінку резервуара, значення якого не перевищує розраховане експлуатаційне значення $W_e=508$ Па.

2) Область появи небажаних напружень та пластичних деформацій, що відповідає швидкості повітряного потоку від 27,5 м/с до 54 м/с та максимальному тиску від 508 Па до розрахованого граничного значення $W_m=1924$ Па. Накопичення залишкових (пластичних) деформацій може призводити до необхідності виведення РВС з експлуатації для проведення поточного обслуговування та/або ремонту.

3) Аварійна область, що характеризується високою ймовірністю втрати несучої здатності при швидкості повітряного потоку, що перевищує значення 54 м/с, максимальний тиск на стінку резервуара перевищує розраховане граничне значення 1924 Па.

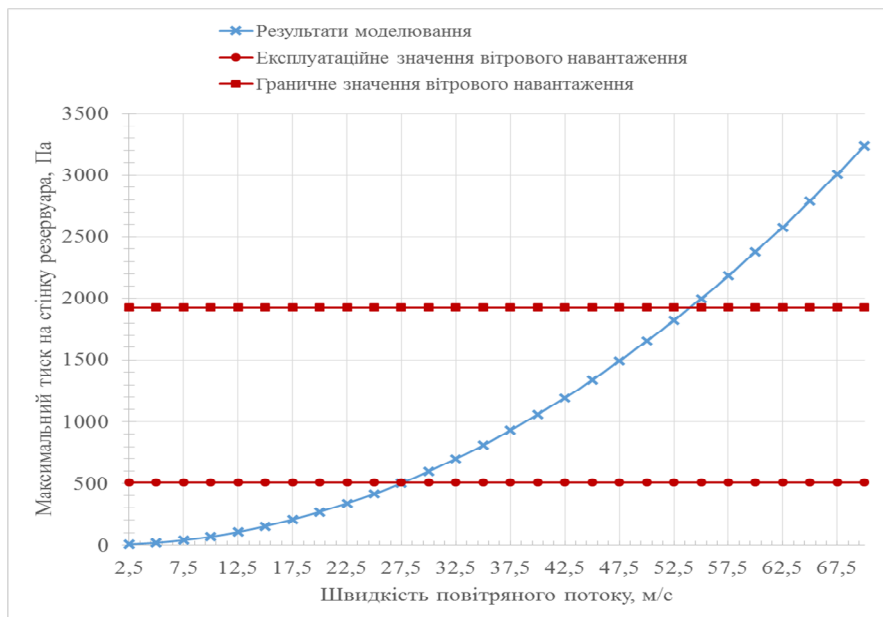


Рис. 4. Залежність максимального тиску на резервуар від швидкості повітряного потоку

Крім зазначеного, під впливом вітрового навантаження змінюється просторове положення резервуару та виникають небажані вібраційні збурення елементів конструкцій. Тому для забезпечення безпечної експлуатації резервуару у двох останніх випадках значень швидкості повітряного потоку необхідно розробити спеціальні засоби захисту резервуарів від негативного впливу вітрового навантаження.

У третьому розділі

на основі імітаційного моделювання проведено розробку засобів захисту резервуарів з ЕНР від вітрового навантаження. Обґрунтовано конструкцію, визначено характеристики та досліджено ефективність засобу пасивного захисту РВС від вітрового навантаження для двох випадків: резервуарів з підземним та наземним фундаментами.

Реакція об'єктів на вітрове навантаження обумовлюється жорсткістю конструкції, зокрема реакція конструкцій низької жорсткості значною мірою залежить від динамічного характеру вітрового навантаження, а жорсткі конструкції сприймають вітер як статичне навантаження. Для захисту від вітрового навантаження жорстких конструкцій, до яких відносяться РВС, доцільним є використання засобів пасивного захисту – нерухомих об'єктів (систем), які встановлюються поблизу/на/навколо об'єкта контролю (захисту), сприймають основне вітрове навантаження та змінюють напрям повітряного потоку. Одним з засобів пасивного захисту, які широко використовуються, є обтічник – конструкція спеціальної форми, яка полегшує обтікання об'єкта потоком рідини або газу. Використання обтічника дозволить

забезпечити допустимі для безпечного функціонування резервуарів значення швидкості повітряного потоку та зменшити ймовірність появи небажаних напружень і деформацій, які можуть призвести до появи та розвитку пошкоджень.

У дисертаційній роботі проаналізовано існуючі підходи до розробки обтічників, а також обмеження, що накладаються на їх тип, конструкцію та характеристики вимогами фізичної реалізації у важкодоступних місцях установки резервуарів. Обґрунтування, розробку та аналіз ефективності захисних засобів для РВС з ЕНР виконано на основі імітаційного моделювання.

Першим завданням є побудова моделей обтічника різних форм і розмірів, а також моделей системи об'єкт-обтічник для подальшого дослідження. Є велика кількість різноманітних геометричних фігур, які можна використати як основу для побудови обтічника, тому для пошуку найбільш ефективних форм було прийнято рішення проводити імітаційне моделювання з використанням невеликих груп можливих конструктивних рішень засобу захисту. У разі низької ефективності всіх форм першої групи здійснюється перехід до другої групи геометричних фігур і так далі. В дисертаційній роботі ефективність засобу захисту визначається вимогою зниження на 40% максимального повітряного тиску на стінку РВС (зниження тиску з 1339 Па до 800 Па), що забезпечить розширення зони безпечної експлуатації об'єкта захисту згідно з результатами, наведеними на рис. 4. Для досліджень обрано обтічники з наступними геометричними фігурами в їх поперечному перерізі: коло, квадрат, зірка. Для обтічників зазначених форм досліджено вплив таких характеристик:

- ширина/радіус обтічника, значення яких приймалися 500 мм; 750 мм; 1000 мм;
- відносна висота обтічника h , як частка висоти самого резервуара;
- міжосьова відстань L – відстань між вертикальними осями резервуара і обтічника круглої форми, значення якої обрано від 5 м до 9 м з кроком 1 м (для обтічників квадратної і зіркоподібної форми вертикальна вісь утворюється з'єднанням точок, отриманих при перетині діагоналей на нижній і верхній основах).

За допомогою CAD-системи CATIA побудовано сімдесят п'ять геометричних моделей для кожної форми обтічника з різними комбінаціями висоти обтічника, його радіусу/ширини, міжосьової відстані. Приклад моделі системи об'єкт-обтічник для РВС з наземним фундаментом і обтічника зіркоподібної форми наведено на рис. 5. Імітаційне моделювання впливу вітрового навантаження (швидкість вітрового потоку 45 м/с) на РВС з наземним фундаментом при наявності обтічника різних форм

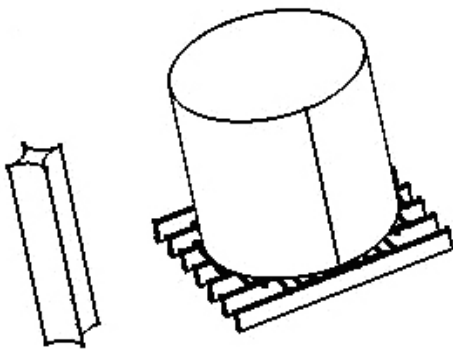


Рис. 5. Приклад моделі системи об'єкт-обтічник

і характеристик проведено за допомогою програмного комплексу ANSYS в два етапи. На першому етапі проведено більше 225 моделювань з використанням грубої сітки (близько 1 мільйона тетраедрів) для виявлення найбільш прийнятних комбінацій характеристик системи об'єкт-обтічник за умови досягнення заданої ефективності. Аналіз результатів моделювання показав, що найбільше зменшення максимального

тиску (на 64%) досягається при використанні обтічника зіркоподібної форми з радіусом 1000 мм, висотою, що дорівнює висоті резервуара і міжосьовою відстанню 9 м. Обтічник квадратної форми з такими ж характеристиками показав себе менш ефективним (зменшення максимального тиску на 36%). Обтічники круглого перетину в даному дослідженні показали порівняно низьку ефективність (до 25 % зниження тиску повітряного потоку на стінку резервуара), тому надалі розглядатися не будуть. Графіки залежності максимального тиску на резервуар при наявності обтічників від відносної висоти обтічника для найбільш ефективних з розроблених обтічників наведено на рис. 6.

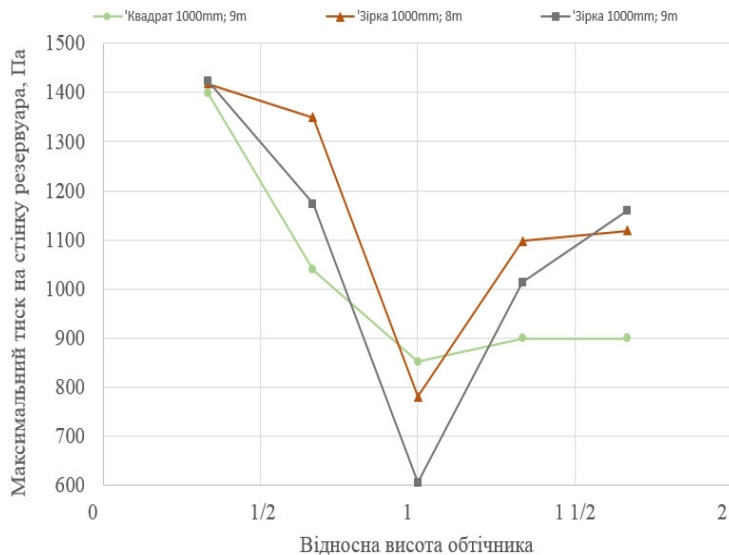


Рис. 6. Графіки залежності максимального тиску повітряного потоку на стінку захищеного резервуара від відносної висоти обтічника

а при використанні обтічника зіркоподібної форми область безпечної експлуатації розширюється до значення швидкості вітру в 44 м/с.

На другому етапі зазначені вище обтічники досліджено з використанням більш якісної скінчено-елементної сітки (більше 2 мільйонів тетраедрів) для швидкостей повітряного потоку від 2,5 м/с до 70 м/с з кроком в 2,5 м/с. За результатами моделювання визначено функціональні залежності максимального тиску на стінку захищеного РВС з наземним фундаментом від швидкості повітряного потоку (рис. 7). Як видно, при використанні обтічника з квадратним перетином область безпечної експлуатації РВС збільшується до значення швидкості вітру в 35 м/с,

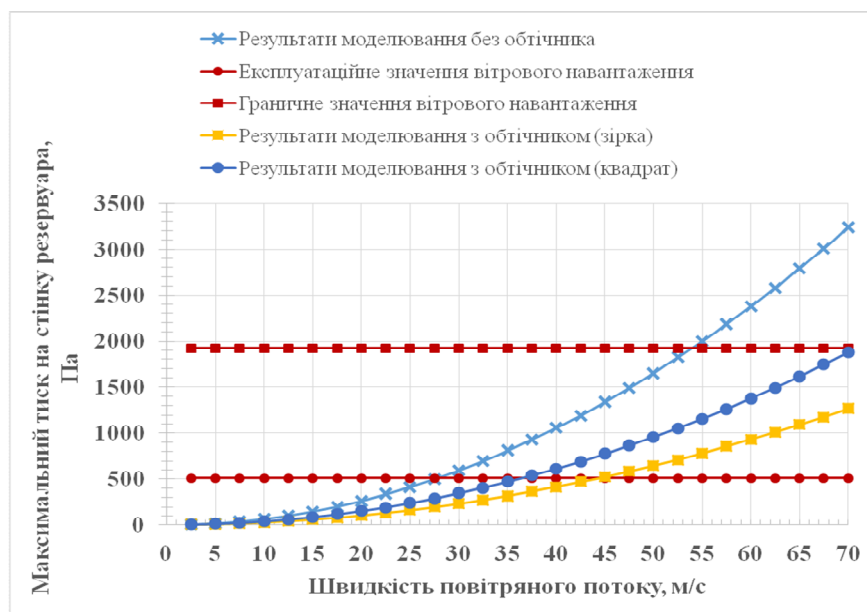


Рис. 7. Графік залежності максимального тиску на стінку резервуара з наземним фундаментом від швидкості повітряного потоку

Застосування розроблених засобів захисту дозволить уникнути втрати резервуаром несучої здатності навіть при критичних швидкостях вітру понад 55 м/с, так як максимальний тиск на поверхні РВС не перевищуватиме граничного розрахункового значення.

Велика кількість резервуарів для зберігання ЕНР зводиться на підземному фундаменті. Тому для таких РВС з обтічниками проведено аналогічне моделювання і визначено функціональну залежність максимального тиску на стінку резервуара з підземним фундаментом від швидкості повітряного потоку, яка за характером подібна до наведеної на рис. 7 для резервуарів з наземним фундаментом. Область безпечної експлуатації резервуарів з підземним фундаментом розширюється до значення швидкості вітру в 40 м/с при застосуванні обтічника зіркоподібної форми (радіус 1000 мм, висота становить 4/3 висоти резервуара, міжосьова відстань 9 м).

Таким чином, результати імітаційного моделювання показали, що вимогам зменшення на 40% максимального тиску повітряного потоку для резервуарів з наземним та підземним фундаментом задовольняє обтічник зіркоподібної форми. Ефективність такого засобу пасивного захисту складає в середньому відповідно 60 % та 52 % в широкому діапазоні значень швидкості повітряного потоку. За результатами імітаційного моделювання при швидкості повітряного потоку 45 м/с отримано систему апроксимаційних залежностей для визначення параметрів обтічника за відомим значенням максимального тиску на стінку резервуара

$$\begin{cases} P = 739,27h^2 - 2041,5h + 2037,5 \\ P = -4,7801L^3 + 140,88L^2 - 1379,3L + 5105,1, \\ P = -17,521d^3 + 235,95d^2 - 1085,9d + 1902,7 \end{cases}$$

де h – висота об'єкта захисту, м; L – міжосьова відстань, м; d – діаметр обтічника; P – максимальний тиск на стінку об'єкта захисту.

Коефіцієнт детермінації для кожного рівняння системи становить $R^2 > 0,95$.

Четвертий розділ присвячено вдосконаленню системи функціональної діагностики РВС на основі імітаційного моделювання.

В дисертації обґрунтовано, розроблено та запатентовано автоматизовану систему функціональної діагностики (рис. 8) на основі комплексного використання інформації про вібраційний стан, параметри напружено-деформованого стану та просторове положення РВС під впливом динамічних навантажень у поєднанні з використанням специфічних діагностичних моделей РВС. Удосконалена система функціональної діагностики є комплексною, багатоканальною, містить розроблену на основі імітаційного моделювання підсистему візуалізації даних і призначена для попередження руйнування РВС та витоків ЕНР. Комплексний підхід забезпечує:

- отримання, аналіз та використання інформації про реальний вібраційний стан конструкції резервуару;
- створення та аналіз діагностичної моделі резервуару з урахуванням реальних умов динамічних та статичних навантажень для визначення характеристик стійкості та напружень конструкції резервуара;
- отримання інформації про зміну ТС;

- збір та аналіз інформації про вібраційний стан фундаменту, на якому встановлено резервуар, про просторове положення резервуара для визначення ознак зміни динамічного та статичного навантаження на конструкцію резервуара;
- автоматизацію процесу збору, перетворення, зберігання, візуалізації та аналізу діагностичної інформації для прийняття рішення про поточний функціональний стан резервуара та прогнозування його динаміки.

Система дозволяє на ранніх стадіях розвитку руйнівних процесів здійснити прогнозну оцінку ТС резервуара (на основі побудованих трендів з екстраполяцією результатів для кожного окремого діагностичного параметра) і реалізувати комплекс превентивних заходів по попередженню руйнування об'єкта.

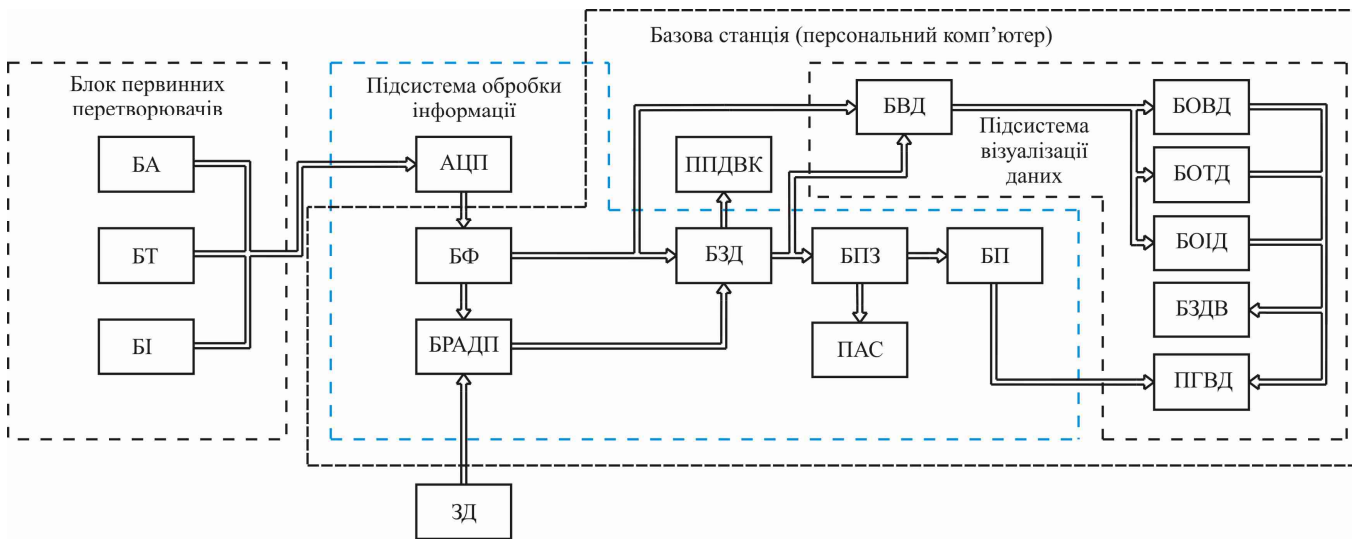


Рис. 8. Функціональна схема автоматизованої системи функціональної діагностики:

БА, БТ, БІ – блоки акселерометрів, тензорезисторів та інклінометрів відповідно;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; БФ – блок фільтрів; БРАДП – блок розрахунку та аналізу діагностичних параметрів; ЗД – зовнішні дані; БЗД – блок збереження даних; ППДВК – пристрій передачі даних віддаленому користувачу; БПЗ – блок порогових значень; ПАС – пристрій аварійної сигналізації; БП – блок прогнозу; БВД – блок вибору даних; БОВД, БОТД, БОІД – блоки обробки вібраційних, тензометричних та інклінометричних даних відповідно; БЗДВ – блок збереження даних візуалізації; ПГВД – блок графічного відображення даних

Система складається з блоку вимірювальних перетворювачів та двох підсистем: обробки інформації та візуалізації даних. В дисертації на основі імітаційного моделювання розроблено підсистему візуалізації для відображення та прогнозування характеристик напружено-деформованого стану, просторового положення та вібраційного стану резервуару в реальних умовах навантажень.

Для розкриття особливостей функціонування, опису істотних параметрів розробленої підсистеми візуалізації, а також зв'язків між ними створено її інформаційну модель (рис. 9). Модель використовує зовнішні (вхідні) дані, які є сигналами з трьох типів первинних перетворювачів: акселерометра (ВК), тензорезистора (ТК) та інклінометра (ІК). Окрім цього, як джерела інформації, можуть використовуватися математичні моделі каналів вібрації (МВК), тензометрії (МТК) та інклінометрії (МІК), або файли з вібраційними (ВД), тензометричними (ТД) та інклінометричними-

ми (ІД) даними. Обробка вхідних даних виконується у модулі обробки сигналів вібрації (включає в себе спектральний (СА) та частотно-часовий (ЧЧА) аналіз) та в модулі імітаційного моделювання, який призначений для перетворення вхідних тензометричних та інклінометричних даних спеціалізованим програмним забезпеченням (ПЗ) у відповідні візуальні зміни моделі об'єкта контролю (МОК). Для забезпечення повноти аналізу МОК може доповнюватися або спрощуватися за допомогою моделей елементів конструкції, що містяться в елементній базі (ЕБ).

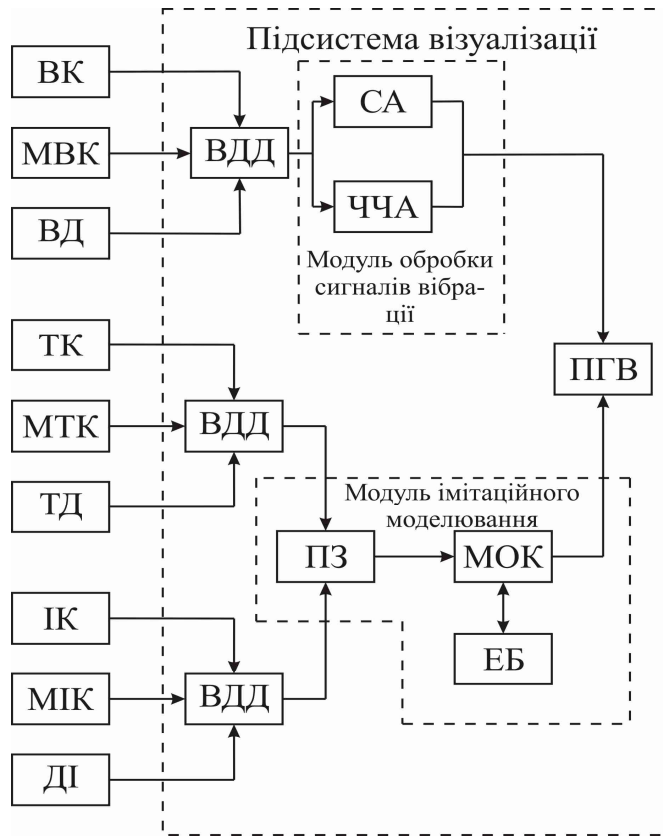


Рис. 9 Інформаційна модель підсистеми візуалізації:

ВК – вібраційний канал; МВК – модель вібраційного каналу; ВД – вібраційні дані; ТК – тензометричний канал; МТК – модель тензометричного каналу; ТД – тензометричні дані; ІК – інклінометричний канал; МІК – модель інклінометричного каналу; ДІ – дані інклінометрії; ВДД – вибір джерела даних; СА – спектральний аналіз; ЧЧА – частотно-часовий аналіз; ПЗ – спеціалізоване програмне забезпечення; МОК – модель об'єкта контролю; ЕБ – елементна база; ПГВ – пристрій графічного відображення

основі мови програмування Processing, яка дозволяє працювати з тривимірною графікою, реалізовано програму відображення на геометричній моделі об'єкта даних тензометричних вимірювань, попередньо записаних у файл, відображення поточного просторового положення об'єкта шляхом візуалізації вимірюваних кутів нахилу

Для модулів підсистеми візуалізації розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення (АПЗ), яке забезпечує обробку та перетворення вихідних даних з датчиків, їх введення в імітаційну модель, керування геометричною моделлю (додавання необхідних або виключення зайвих елементів), проведення імітаційного моделювання, відображення результатів.

Розроблено АПЗ для візуалізації вібраційних даних, яке забезпечує обробку (перетворення) записаних у файл вихідних даних та побудову графіків за результатами спектрального та частотно-часового аналізу з урахуванням особливостей запису даних у файл, параметрів АЦП (розрядність, вхідний діапазон), кількості вимірювальних каналів.

Розроблено АПЗ для візуалізації комплексних вимірювань напружень та просторового положення, яке забезпечує обробку (перетворення) записаних у файл вихідних даних для коректного їх відображення на імітаційній моделі резервуара з урахуванням особливостей запису даних у файл, параметрів АЦП (розрядність, вхідний діапазон), кількості датчиків інформації, яка впливає на кількість елементів тривимірної моделі для відображення даних. На

конструкції відносно вертикальної осі (рис.10). Для напружень обрано п'ять проміжків візуалізації даних, для кожного виділено свій колір відображення даних на геометричній моделі об'єкта. Програма є універсальною, в залежності від реальних даних (кількості вимірювальних перетворювачів, місць їх розташування, величини напружень, розрахованих граничних значень, тощо) програмний код можна змінити або розширити для більш точної відповідності поставленим задачам.

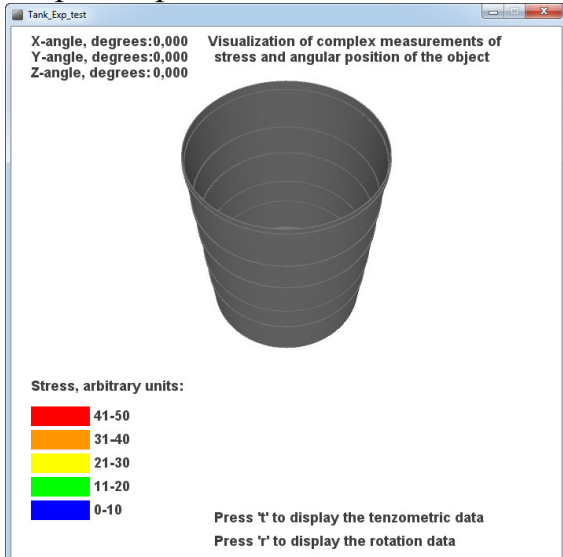
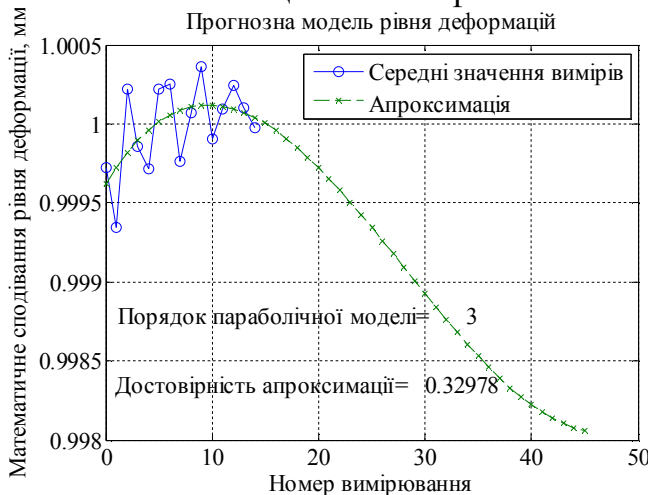


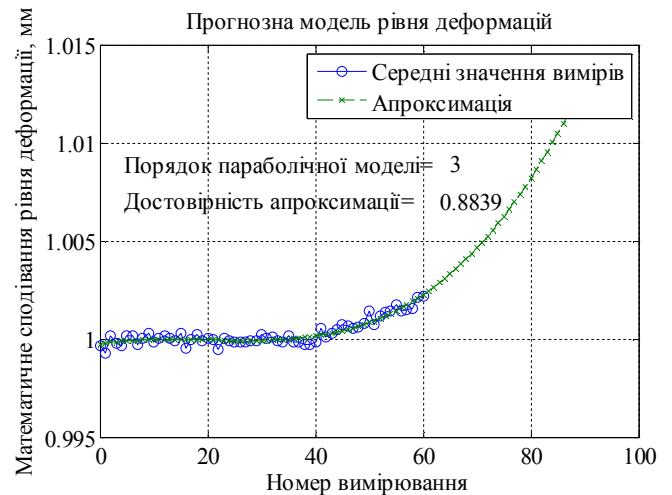
Рис. 10. Головне вікно програми

Розроблено АПЗ для прогнозування росту рівня деформації й виведення відповідних графіків у вигляді екстрапольованих ліній тренду (рис. 11). Розроблено методику, за якою тренд визначається за середніми значеннями моделі сигналів деформації за допомогою методу найменших квадратів з використанням параболічних моделей до третього порядку включно. Показано, що точність прогнозу можна підвищити за рахунок збільшення кількості вихідних даних, а достовірність апроксимації – за рахунок наявності певної функціональної залежності між зміною середнього рівня деформацій.

Для перевірки адекватності розробленої для підсистеми візуалізації імітаційної моделі РВС проведено порівняльний аналіз модальних характеристик, отриманих шляхом імітаційного та фізичного моделювання.



а)



б)

Рис. 11. Приклад екстраполяції тренду для: а) 15 вимірювань; б) 61 вимірювання

Для фізичного моделювання використано вертикальний сталевий резервуар циліндричної форми об'ємом $0,04 \text{ м}^3$, для якого була створена спрощена тривимірна модель в графічному пакеті CATIA (рис. 12). Спрощення моделі полягає у виключенні з розгляду деяких елементів конструкції (ручок і затискачів кришки) для оптимізації співвідношення час розрахунку/точність результатів при імітаційному моделюванні. Імітаційна модель складається з п'яти поясів та п'яти ребер жорсткості, які чергуються між собою. Ребра жорсткості виконані у вигляді одного елементу конструкції, а кожен пояс розбито на чотири рівні частини (сегменти).



Рис. 12. Модель об'єкта контролю: а) фізична модель; б) геометрична модель

Модальний аналіз імітаційної моделі резервуара проведено у програмному комплексі ANSYS, в результаті визначено перші 20 форм і частот коливань (табл. 1).

Таблиця 1. Результати модального аналізу в програмному комплексі ANSYS

Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц
1	303,81	6	414,43	11	745,63	16	909,03
2	303,81	7	559,43	12	745,64	17	931,02
3	407,62	8	559,44	13	780,91	18	931,04
4	407,62	9	742,77	14	780,93	19	965,38
5	414,4	10	742,83	15	908,99	20	965,42

Фізичне моделювання проведено за діагностичним методом вільних коливань з використанням макету каналу вимірювання вібрації системи функціональної діагностики. Для вимірювання імпульсного відклику конструкції резервуару використано блок акселерометрів, що містить два закріплених на платі мікромеханічні датчики MS8002.D фірми Colibrys (вимірювальні осі акселерометрів є ортогональними). Для обробки сигналів вібрації та візуалізації даних вимірювань використано методи спектрального та частотно-часового аналізу. Результати аналізу наведено на рис. 13.

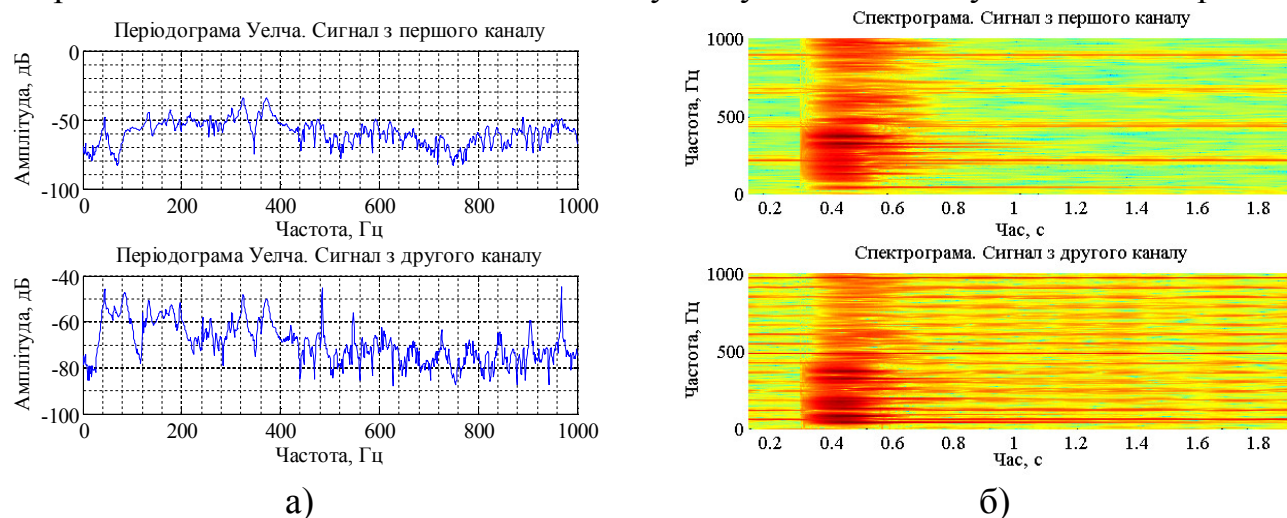


Рис. 13. Результати обробки сигналів вібрації: а) амплітудний спектр; б) частотно-часове подання

Порівняльний аналіз отриманих результатів імітаційного та фізичного моделювання показав, що об'єкт здійснює коливання в горизонтальній площині за першими двома модами. В спектрі присутні й складові на вищих частотах, які можна віднести до коливань за 3-6 формами. Складові на низьких частотах, які присутні до моменту імпульсного збудження (рис. 13, б), є шумом й виключені з розгляду. Значення відносної похибки визначення частоти коливань за першою формою експериментальним шляхом і чисельними методами становить 6,3 %, що є прийнятним і свідчить про адекватність імітаційної моделі для її практичного використання в системі функціональної діагностики.

У додатках наведено акти про впровадження результатів дисертаційної роботи та креслення обраного для досліджень резервуара.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача вдосконалення засобів функціональної діагностики резервуарів та засобів їх захисту від вітрового навантаження на основі імітаційного моделювання для забезпечення безаварійної експлуатації резервуарів, що знаходяться у важкодоступних місцях під впливом динамічних та кліматичних навантажень.

1. Аналіз сучасного стану методів та засобів функціональної діагностики резервуарів з ЕНР, які знаходяться у важкодоступних місцях під впливом динамічних та кліматичних навантажень, показав, що для попередження руйнування резервуарів та витоків ЕНР недостатньо лише проводити контроль цілісності та оцінювання загального ТС їх конструкції. Обґрунтовано необхідність оцінити відповідність реальних умов експлуатації розрахунковим значенням навантажень, розробити відповідні засоби захисту резервуарів від дії навантажень, що перевищують розрахункові значення, вдосконалити засоби функціональної діагностики з метою оцінки та прогнозування ТС елементів конструкції резервуарів. Запропоновано та обґрунтовано вирішити поставлені завдання на основі імітаційного моделювання, яке на сьогоднішній день є потужним інструментом наукових досліджень та перспективним напрямком розвитку засобів моніторингу та діагностики складних просторових об'єктів, що знаходяться у важкодоступних місцях під впливом динамічних та кліматичних навантажень.

2. Проведено геометричне та імітаційне моделювання резервуара в умовах вітрового навантаження для встановлення характеру і функціональної залежності впливу вітрового навантаження на резервуар, в результаті якого:

- створено шість основних геометричних моделей, які відрізняються наявністю фундаменту, повітряних дихальних клапанів та формою даху, та встановлено вплив елементів конструкції на характер розподілу швидкості повітряного потоку та його тиску на резервуар, на основі отриманих результатів обрано модель резервуару для подальших досліджень;

- в результаті імітаційного моделювання встановлено характер і функціональну залежність впливу вітрового навантаження на резервуар, за якою визначено три експлуатаційні області: область безпечної експлуатації при швидкостях повітряного потоку до 27,5м/с; область появи напружень та пластичних деформацій в елементах конструкції резервуару при швидкостях повітряного потоку в межах 27,5м/с-54м/с;

область потенційної втрати несучої здатності резервуару при швидкостях повітряного потоку понад 54м/с;

- обґрунтовано необхідність розробки спеціальних засобів захисту резервуарів для розширення області їх безпечної експлуатації в умовах, коли вітрові навантаження перевищують розрахункові значення.

3. Для зниження величини тиску повітряного потоку розроблено, теоретично обґрунтовано та досліджено геометричні моделі засобів захисту резервуарів від вітрового навантаження різних форм у поперечному перерізі: коло, квадрат, зірка. Проведено аналіз ефективності засобів захисту для резервуарів з наземним та підземним фундаментами та встановлено, що величина зниження максимального тиску повітряного потоку на стінку резервуара, що обрана як показник ефективності, складає понад 60% для резервуарів з наземним фундаментом та понад 50% для резервуарів з підземним фундаментом.

Установлено спрощені функціональні залежності максимального тиску повітряного потоку на стінку резервуара з підземним фундаментом при використанні засобу захисту зіркоподібної форми від параметрів: діаметра обтічника, його висоти та міжосьової відстані.

Установлено, що використання розроблених засобів захисту від вітрового навантаження дозволить розширити зону безпечної експлуатації резервуара з підземним фундаментом на 45%, а з наземним спеціальної конструкції – на 64%.

4. Розроблено та обґрунтовано загальну структуру та принцип функціонування вдосконаленої багатоканальної системи функціональної діагностики резервуарів на основі використання імітаційних моделей, яка містить три вимірювальні канали (вібраційний, тензометричний та інклінометричний), зовнішній модуль визначення величини природних чи техногенних збурень, підсистеми візуалізації результатів і прогнозування ТС елементів конструкції резервуару.

5. На основі імітаційного моделювання розроблено підсистему візуалізації даних тензометричних та інклінометричних вимірювань, яка забезпечує: перетворення вихідних даних та їх введення в імітаційну модель; візуальне уявлення елементів контрольованого об'єкта і керування моделлю (параметричне геометричне моделювання); імітацію взаємодії елементів конструкції (імітаційне моделювання); обробку та візуальне відображення результатів вимірювань. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для обробки та візуалізації вібраційних вимірювань і прогнозування зміни рівня деформацій елементів конструкції резервуару.

6. На основі порівняльного аналізу результатів експериментальних досліджень фізичної моделі резервуара і макета каналу вимірювання вібрації системи діагностики та результатів скінчено-елементного моделювання фізичної моделі резервуару встановлено, що адекватність імітаційної моделі становить понад 90%, що є прийнятним для використання імітаційних моделей резервуара у підсистемі візуалізації системи функціональної діагностики.

7. Результати досліджень впроваджено в Національному антарктичному науковому центрі МОН України при розробці автоматизованої системи раннього попередження витоків палива на українській антарктичній станції Академік Вернадський та в навчальний процес кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Tsybulnik S.A. Simulation of the impact of wind load on the vertical steel tank / N.I. Bouraou, Y.G. Zsukovskiy, A.V. Kuzko, S.A. Tsybulnik, D.V. Shevchuk // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 70-80 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших). *Здобувачем побудовано геометричні моделі резервуара, проведено аналітичний розрахунок та імітаційне моделювання вітрового навантаження на резервуар.*
2. Цибульник С.О. Вимоги до розробки інформаційно-діагностичного комплексу моніторингу резервуарів з паливом в умовах Антарктики / Н.І. Бурау, Ю.Г. Жуковський, О.В. Кузько, С.О. Цибульник, Д.В. Шевчук // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – Київ, 2013. – Вип. 45. – С. 107-115 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших). *Здобувачем побудовано геометричну модель резервуара, яка відповідає реальній конструкції.*
3. Цибульник С.А. Эффективное средство защиты резервуаров от ветровой нагрузки. Часть 1. Построение геометрической модели обтекателя / С.А. Цибульник // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – Київ, 2013. – Вип. 46. – С. 80-85 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших).
4. Цибульник С.А. Эффективное средство защиты резервуаров от ветровой нагрузки. Часть 2. Моделирование ветровой нагрузки / С.А. Цибульник // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – Київ, 2014. – Вип. 47. – С. 119-126 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших).
5. Цибульник С.А. Концепция визуализации данных в информационно-диагностических комплексах / Н.И. Бурау, С.А. Цибульник // Вісник інженерної академії України. – Київ, 2015. – №1. – С. 96-99. *Здобувачем запропоновано концепцію візуалізації даних вимірювань в багатоканальних інформаційно-діагностичних комплексах на базі імітаційного моделювання та систем захвату руху.*
6. Цибульник С.А. Исследование макета канала измерения вибрации комплексной системы мониторинга вертикальных стальных резервуаров / Н.И. Бурау, С.А. Цибульник, Д.В. Шевчук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технол. центр, 2015. – Вип. 5. – №9 (77). – С. 45-52. (Входить до Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, Index Copernicus, WorldCat, РИНЦ, Directory of Open Access Journals та інших). *Здобувачем побудовано геометричну модель резервуара, проведено модальний аналіз та написано алгоритми завантаження та перетворення даних, а також формування скорегованих векторів даних для програми обробки сигналів вібрації.*
7. Пат. на кор. модель 73310 Україна, МПК G01 М 7/00. Інформаційно-діагностичний комплекс моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних споруд / Бурау Н.І., Жуковський Ю.Г., Кузько О.В., Цибульник С.О., Шевчук Д.В.; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – №U201115682; заявл. 30.12.13; опубліковано 25.09.2012, Бюл. № 18. – 4 с.: іл. *Здобувачем обґрунтовано принципи роботи пристрою графічного відображення результатів.*
8. Пат. на кор. модель 73359 Україна, МПК G01 Н 11/00. Спосіб вимірювання малих лінійних переміщень протизсувних споруд / Бурау Н.І., Жуковський Ю.Г.,

Куліш Е.В., Цибульник С.О., Шевчук Д.В.; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – №U201201740; заявл. 16.02.12; опубліковано 25.09.2012, Бюл. № 18. – 2 с.: іл. *Здобувачем проведено теоретичне обґрунтування способу вимірювання ма-лих лінійних переміщень.*

9. Пат. на кор. модель 82968 Україна, МПК G01 М 7/00. Автоматизований діагностичний комплекс моніторингу і прогнозування технічного стану будівель та споруд / Артем'єва Г.М., Бурау Н.І., Кузько О.В., Жуковский Ю.Г., Цибульник С.О., Шевчук Д.В.; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – №U201301413; заявл. 06.02.13; опубліковано 27.08.2013, Бюл. № 16. – 3 с.: іл. *Здобувачем обґрунтовано принципи роботи системи.*

10. Цибульник С.А. Исследование ветровой загрузки на резервуар с дизельным топливом в условиях Антарктики / Н.И. Бурау, Ю.Г. Жуковский, С.А. Цибульник, Д.В. Шевчук // Материалы XIX международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» (3-7 октября 2011г., г. Гурзуф). – Гурзуф, 2011. – С.70-72. *Здобувачем описано характер вітрового навантаження на резервуар в умо-вах Антарктики.*

11. Цибульник С.О. Імітаційне та фізичне моделювання системи моніторингу конструкцій в експлуатації / Н.І. Бурау, С.О. Цибульник, Д.В. Шевчук // IV міжнародна науково-технічна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування»: Праці конференції / ТНТУ ім. Івана Пулюя. – Тернопіль: ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2015. – С. 98-101. *Здобувачем проведено модальний аналіз резервуара.*

12. Цибульник С.А. Сравнительный анализ методов обработки вибрационных сигналов / С.А. Цибульник, А.С. Попов // Новые направления развития приборостроения. Материалы 8-й международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (24 апреля 2015г. Г. Минск, Республика Беларусь) / БНТУ, Приборостроительный факультет. – Минск, 2015. – С. 242. *Здобувачем проведено порівняння методів обробки сигналів вібрації.*

13. Цибульник С.А. Построение пространственной модели объекта мониторинга / С.А. Цибульник, Д.В. Шевчук // IV науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2011. – С. 48. *Здобувачем проведено огляд тривимірних моделей вертикального сталевго резервуара, а також проблем, які виникли в процесі їх побудови.*

14. Цибульник С.А. Трехмерная модель резервуара для хранения топлива в Антарктике / Ю.Г. Жуковский, А.М. Главацкий, А.В. Кузько, С.А. Цибульник // X міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2011: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2011. – С. 21-22. *Здобувачем побудовано три геометричні моделі вертикального сталевго резервуара.*

15. Цибульник С.А. Предотвращение утечек в резервуаре для хранения эколого-опасных веществ в Антарктиде / С.А. Цибульник, Д.В. Шевчук // XIV міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологія. Людина. Суспільство». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ». – Київ,

2011. – С. 247-248. *Здобувачем створено ряд тривимірних моделей резервуара різної складності.*

16. Цыбульник С.А. Геометрическое и имитационное моделирование резервуара для топлива / С.А. Цыбульник, Д.В. Шевчук // 3-тя науково-практична конференція студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання». Збірник тез доповідей. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 165-166. *Здобувачем проведено оптимізацію геометричних моделей резервуара для коректної побудови скінчено-елементної сітки.*

17. Цыбульник С.А. Выбор геометрической модели резервуара для хранения топлива / С.А. Цыбульник, Д.В. Шевчук // V науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2012. – С. 44. *Здобувачем проведено імітаційне моделювання для вибору найбільш оптимальної геометричної моделі резервуара з метою її використання у одному з блоків автоматизованої системи діагностики.*

18. Цыбульник С.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния вертикального стального резервуара / С.А. Цыбульник // Первая Всеукраинская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные тенденции развития приборостроения» (19-20 ноября 2012г. г. Луганск, Украина). Сборник тезисов докладов / ВНУ ім. В. Даля, кафедра «Прилади». – Луганськ, 2012. – С. 314-315.

19. Цыбульник С.О. Зменшення динамічних збурень, викликаних вітровим навантаженням на резервуар для пального / С.О. Цыбульник, Д.В. Шевчук // VI міжнародна Антарктична конференція «Інтернаціоналізація досліджень в Антарктиці – шлях до духовної єдності людства» / НТУУ «КПІ». – Київ, 2013. – С. 352-355. *Здобувачем показано, що неправильно підібрані параметри засобу пасивного захисту від вітрового навантаження призводять до появи додаткових динамічних збурень у вигляді вібрації.*

20. Цыбульник С.А. Защита вертикальных стальных резервуаров от ветровой нагрузки / С.А. Цыбульник // 4-та науково-практична конференція студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання». Збірник тез доповідей. – Івано-Франківськ, 2013. – С. 193-194.

21. Цыбульник С.А. Функциональная диагностика резервуаров для хранения экологически-опасных веществ / С.А. Цыбульник // XIII міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (23-24 квітня 2014р. м. Київ, Україна). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2014. – С. 24-25.

22. Цыбульник С.А. Перспективы развития систем функциональной диагностики инженерных сооружений / С.А. Цыбульник // VII міжнародна Антарктична конференція «Антарктичні дослідження: нові горизонти та пріоритети» / НТУУ «КПІ». – Київ, 2015. – С. 163-165.

23. Цыбульник С.А. Определение собственных частот вертикального стального резервуара по данным виброизмерений / С.А. Цыбульник // XIV міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22-23 квіт-

ня 2015р. м. Київ, Україна). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2015. – С. 25-26.

24. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 61750, Комп'ютерна програма «Програма візуального відображення даних тензометричних вимірювань», Цибульник С.О., Півторак Д.О., дата реєстрації – 18.09.2015. Державна служба інтелектуальної власності України. *Здобувачем написано алгоритми завантаження даних та тривимірної моделі, а також відображення даних тензометричних вимірювань на тривимірній моделі.*

25. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 61751, Комп'ютерна програма «Програма обробки сигналів вібрації», Цибульник С.О., Шевчук Д.В., Півторак Д.О., дата реєстрації – 18.09.2015. Державна служба інтелектуальної власності України. *Здобувачем написано алгоритми завантаження та перетворення даних, а також формування скорегованих векторів даних для програми обробки сигналів вібрації.*

26. Цибульник С.А. Средство пассивной защиты резервуаров от ветровой нагрузки в условиях Антарктики / Н.И. Бурау, А.В. Кузько, С.А. Цибульник // Український антарктичний журнал. – Київ, 2014. – №13. – С. 275-280. *Здобувачем проаналізовано результати імітаційного моделювання вітрового навантаження на резервуар в умовах використання засобів пасивного захисту від вітрового навантаження.*

АНОТАЦІЯ

Цибульник С.О. Вдосконалення засобів функціональної діагностики та захисту резервуарів на основі імітаційного моделювання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2016.

Дисертація присвячена вдосконаленню систем функціональної діагностики за допомогою введення в них елементів імітаційного моделювання для прогнозування зміни технічного стану конструкцій, а також розробці засобів захисту об'єктів для зберігання екологічно небезпечних речовин, які експлуатуються у важкодоступних місцях під впливом природних та техногенних збурень, від вітрового навантаження.

Проведено геометричне та імітаційне моделювання резервуара для оцінки впливу елементів його конструкції на зміну величини вітрового навантаження. Встановлено функціональну залежність максимального тиску на стінки резервуара від швидкості повітряного потоку. Розроблено геометричні моделі засобів захисту резервуарів від вітрового навантаження. Досліджено ефективність розроблених засобів захисту для резервуарів з наземним та підземним фундаментами.

Розроблено загальну функціональну схему автоматизованої системи функціональної діагностики. Розроблено підсистему візуалізації та її інформаційну модель, яка містить два основні модулі – модуль обробки сигналів вібрації та модуль імітаційного моделювання. Для підсистеми візуалізації розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення відображення результатів вимірювання вібрації, кутів нахилу та напружень, а також прогнозу зміни рівня пластичних деформацій. Оцінено адекватність використаних імітаційних моделей.

Ключові слова: вертикальний сталевий резервуар, геометричне та імітаційне моделювання, система функціональної діагностики, підсистема візуалізації.

АННОТАЦИЯ

Цыбульник С.А. Усовершенствование средств функциональной диагностики и защиты резервуаров на основе имитационного моделирования. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук за специальностью 05.11.13 – приборы и методы контроля и определение состава веществ. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, 2016.

Диссертация посвящена совершенствованию систем функциональной диагностики с помощью введения в них элементов имитационного моделирования для прогнозирования изменения технического состояния конструкций, а также разработке средств защиты объектов для хранения экологически опасных веществ, которые эксплуатируются в труднодоступных местах под влиянием природных и техногенных возмущений, от ветровой нагрузки.

Для оценки влияния элементов конструкции на результаты имитационного моделирования разработано геометрические модели резервуара. Всего построено шесть сборочных единиц, которые отличаются формой крыши, наличием фундамента и воздушных дыхательных клапанов. В соответствии с действующими нормативными документами рассчитаны эксплуатационное и граничное значения ветровой нагрузки на резервуар, которые определяют зоны безопасной и аварийной эксплуатации. Для разработанных геометрических моделей было проведено имитационное моделирование ветровой нагрузки.

Рассчитано абсолютные и относительные погрешности определения давления воздушного потока на стенку резервуара путем имитационного моделирования по сравнению с его аналитическим расчетом. Показано, что есть необходимость при имитационном моделировании учитывать вектор гравитации, который значительно уточняет результат аналитического расчета. Установлено функциональную зависимость максимального давления на стенки резервуара в зависимости от скорости воздушного потока.

Разработано средство пассивной защиты от ветровой нагрузки для уменьшения величины давления воздушного потока на стенку резервуара с наветренной стороны. Построено геометрические модели обтекателей различных форм в их поперечном сечении: круг, квадрат, звезда. Для исследования эффективности обтекателей в два этапа проведено имитационное моделирование: с грубой (менее 1 миллио-

на элементов) и более плотной (более 2 миллионов элементов) конечно-элементной сеткой. Установлено упрощенные функциональные зависимости для определения геометрических параметров обтекателя со звездообразным сечением в зависимости от требуемой величины максимального давления на стенки резервуара.

Для резервуаров с наземным и подземным фундаментами определена эффективность снижения величины максимального давления на стенки резервуаров при использовании звездообразного обтекателя, которая составляет соответственно 60 % и 50 %. Показано, что эффективность обтекателя можно улучшить путем увеличения его диаметра.

Разработано и запатентовано общую функциональную схему многоканальной, автоматизированной системы функциональной диагностики, которая содержит две основные подсистемы – обработки информации и визуализации данных. Для раскрытия особенностей функционирования, описания существенных параметров подсистемы визуализации, а также связей между ними разработано ее информационную модель. Для усовершенствования разработанной системы функциональной диагностики подсистема визуализации содержит модуль имитационного моделирования, в который интегрировано диагностическую модель резервуара для комплексного отображения результатов напряженно-деформированного состояния и углов наклона конструкции.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для визуализации комплексных измерений напряжений и пространственного положения, которое обеспечивает обработку (преобразование) записанных в файл исходных данных для корректного их отображения на имитационной модели резервуара. Количество датчиков информации (тензорезисторов) влияет на количество элементов трехмерной модели для отображения данных.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для визуализации вибрационных данных, которое обеспечивает обработку (преобразование) записанных в файл исходных данных и построение графиков по результатам спектрального и частотно-временного анализа с учетом особенностей записи данных в файл, параметров АЦП (разрядность, входной диапазон), количества измерительных каналов.

Для оценки адекватности (при помощи анализа модальных характеристик) использованной имитационной модели проведено физическое моделирование с использованием метода свободных колебаний. Сигналы вибрации получены при помощи макета канала измерения вибрации. Для первых двадцати мод проведено конечно-элементное моделирование в программном комплексе инженерного расчета ANSYS. Сравнение результатов физического и конечно-элементного моделирования показало, что адекватность имитационной модели составляет более 90 %, что является приемлемым результатом для интегрирования имитационных моделей в системы функциональной диагностики.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для экстраполяции тренда, который определяется по средним значениям сигналов деформации с помощью метода наименьших квадратов. Определено, что точность прогноза можно повысить за счет увеличения количества выходных данных, а достоверность аппроксимации – за счет наличия определенной функциональной зависимости между изменением среднего уровня деформаций.

Ключевые слова: вертикальный стальной резервуар, геометрическое и имитационное моделирование, система функциональной диагностики, подсистема визуализации.

ABSTRACT

Tsybulnik S. Improvement of means of functional diagnostics and protection of tanks on the basis of simulation. – Manuscript.

Thesis for a candidate scientific degree on specialty 05.11.13 – Devices and methods of control and determination of composition substances. – National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Kiev, 2016.

Thesis is devoted to the improvement of functional diagnostics systems by integrating into them elements of simulation modeling for predicting changes in technical state of constructions. Thesis is also devoted to the development of protection means for objects used for storage of environmentally hazardous substances and operated in remote locations under the influence of natural and anthropogenic disturbances or wind load.

A geometric modeling and tank simulation were done to evaluate the impact of its design elements on the change in the wind load distribution. The functional dependence of the maximum pressure on the walls of tank depending on the speed of air flow was established. Geometric models of wind load protection means for tanks were developed. The efficiency of the developed means of protection for tanks with ground and underground foundations was researched.

General functional diagram of the automated system of functional diagnostics was designed. Visualization subsystem and its information model were developed. Visualization subsystem consists of two main modules – vibration signal processing module and simulation. Algorithms and software for visualization of the results of vibration measurements, inclination angles and, stress and plastic deformation prediction were developed for visualization subsystem. Adequacy of simulation models was proved.

Keywords: vertical steel tank, geometric modeling and simulation, system of functional diagnostics, visualization subsystem.